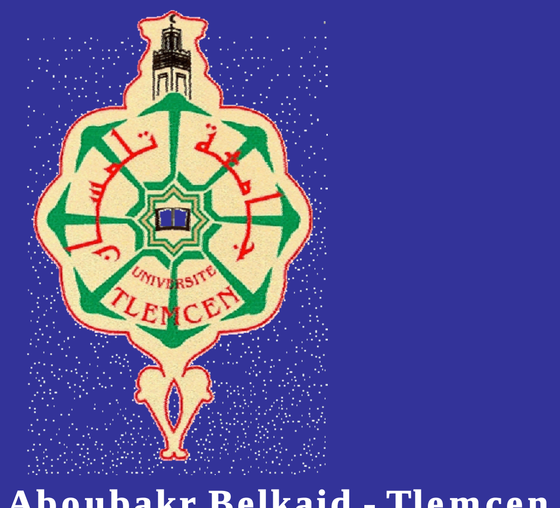


Université Aboubakr Belkaid - Tlemcen

Mécaniques des Sols

Chapitre 2 : Identification et classification des sols

Mme. ROUISSAT Nadia née SMAIL

Département de Génie Civil

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

E-mail : n_rouissat@mail.univ-tlemcen.dz

1 .Origine et formation

Au point de vue géotechnique, les matériaux constituant la croûte terrestre se divisant en deux grandes catégories : les roches et les sols .

Les roches sont compactes, dures et résistantes qui ne peuvent être fragmentées qu'a la suite de très gros efforts mécaniques exp (silice , feldspath ……..)

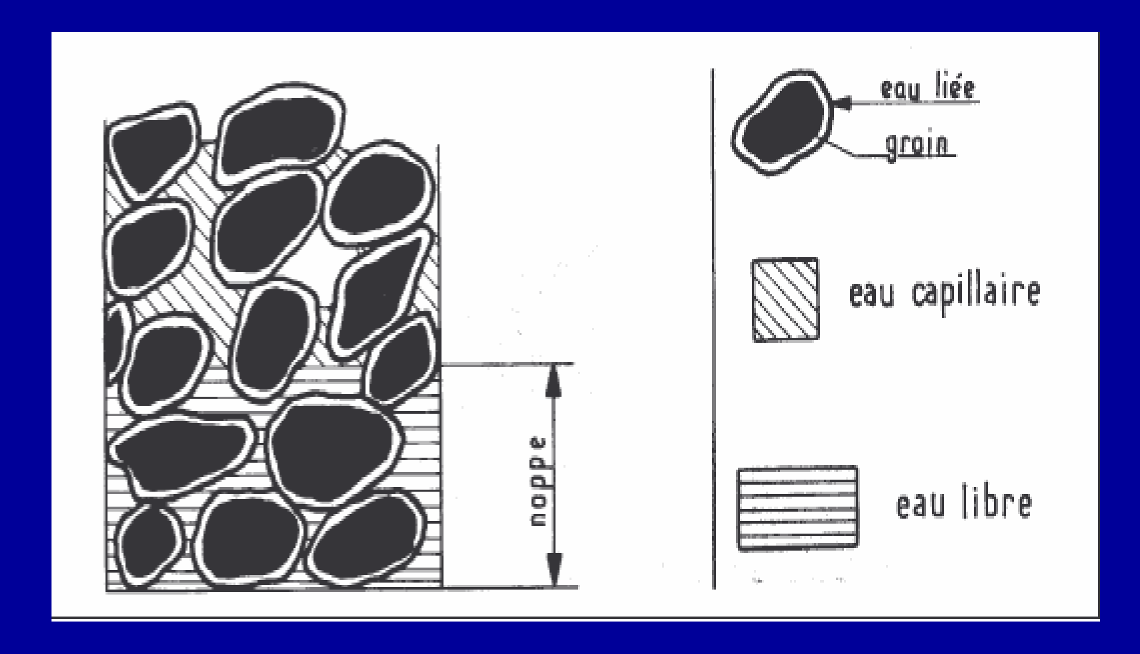
Les sols, au contraire, sont des agrégats minéraux qui peuvent se désagréger en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter d'un effort considérable .

Les sols résultent de l'altération chimique (oxydation …..) physiques (variations de température ,gel ….)ou mécanique (érosion vagues vent …) des roches.

2. Éléments constitutifs d'un sol

Un échantillon de sol est constitué de trois phases :

- **Une phase gazeuse**
- **Une phase liquide**
- **Une phase solide**



2.1. Phase gazeuse

Le gaz contenu dans les vides entre les particules d'un sol est généralement de l'air lorsque le sol est sec, ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide .
Lorsque tous les vides sont remplis d'eau le sol est dit saturé .

2. Éléments constitutifs d’un sol

2.2. Phase liquide

Au sein d’un échantillon de sol fin (diamètre moyen<2µm) ,on distingue plusieurs catégories d’eau :

- L’eau de constitution qui rentre dans la composition chimique des feuillets.

- L’eau liée ou eau adsorbée qui constitue un film autour de chaque grain . Elle n’est pas mobile et ne s’évacue qu’à des températures trés élevées (vers 300ºc)

- L’eau qui est celle qui peut circuler entre les grains . Elle s’évapore complètement lorsque le sol est porté à une temperature légèrerment superieure à100ºc .

2.Éléments constitutifs d'un sol

2.3. Phase solide

Lorsqu' un sol est le résultat d'une désagrégation physique ou mécanique d'une roche , les grains du sol sont constitués des mêmes minéraux que la roche mère .Ils ont en général des dimensions supérieures à2µm, et une forme arrondie .

Lorsque les particules d'un sol ont des dimensions inférieures à 2µm, c'est que le sol est le résultat d'attaques chimiques qui se sont superposées à une désagrégation mécanique de la roche . Les processus chimiques qui interviennent sont la dissolution sous l'action de l'eau, la combinaison et la recristalisation . Il en résulte que les particules d'un sol à grains fins n'ont pas la même structure cristalline que la roche mère .

Les petites particules qui puissent ètre ainsi formées par processus chimiques sont des particules cristallines qui constituent ce que l'on appelle l'argile . Le comportement de ce matériau est complexe et nécessite pour être bien compris une étude à l'echelle moléculaire .

3. Caractères principaux des sols

Les grains d'un sol ne sont pas liés par un ciment comme c'est le cas du béton , mais ils peuvent être soumis à des forces d'attraction intergranulaires diverses : des forces électriques , des forces de Vander Waals…ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance entre les grains augmente.
Elles n'influencent que le comportement des sols à dimensions très faibles . Dans ce cas, le sol est doté d'une cohésion .

Cette constatation va amener le géotechnicien à définir deux grandes familles de sol :
- Les sols grenus qui sont de dimension supérieure à20µm (0.02mm)
- Les sols fins de dimensions inférieures à 20µm .

3. Caractères principaux des sols

3.1. Les sols grenus

Les sols grenus sont ceux pour lesquels les caractéristiques géotechniques sont déterminées par des forces de volume ou de pesanteur . Ils sont en général pulvérulents .

On distingue principalement deux sous-familles :

Sables : 50% des grains au moins sont compris entre 0.02 et 2mm
Graviers :50% des grains au moins sont compris entre 2 et 20mm

3.2. Les sols fins

Les sols fins sont des sols pour lesquels les effets de surface et les Forces entre les particules ont une grande influence sur les caractéristiques (exemple : les argiles). Ils sont aussi appelés sols Cohérents .

4 . Classification des sols

4.1. Classification par la taille des grains solides d'un sol

Ils sont surtout définis granulométriquement . En considérant le diamètre moyen D des grains , on distingue grossièrement:

- Les blocs rocheux	$D>200mm$
- les cailloux	$20mm<D<200mm$
- les graviers	$2mm<D<20mm$
- les sables grossiers	$0.2mm<D<2mm$
- les sables fins	$20\mu m<D<0.2mm$
- les silts ou limons	$2\mu m<D<20\mu m$
- les argiles	$D<2\mu m$

4 . Classification des sols

4 . 2. Classification par le comportement des sols

4.2.1. Comportement des sols grenus (sol pulvérulent :D>20µm)

Les sols grenus:sable gravier, cailloux, blocs sont constitués essentiellement de la sillice (quartz), du calcaire et d'autres roches inertes .Les effets capillaires dus à l'eau sont Négligeable, les grains se comportent comme les granulats inertes du béton .

Le comportement des sols grenus dépend uniquement des paramètres qui caractérisent le squelette solide. Ainsi, que le sable soit sec , humide ou saturé , ses propriétés géotechniques sont à peu prés identiques .

Ce fait tient à ce que les grains d'un sol grenu laissent entre eux des vides de grande dimension ou l'eau peut très facilement circuler , d'autant plus qu'il n'existe pas dans ce type de sol d'eau adsorbée .

Les propriétés des sols grenus dépendent donc avant tout de la dimension des grains solides et de leur état de compacité (état lâche ou serré du squelette) .

4 . Classification des sols

4.2.2. Comportement des sols fins (ou sols cohérents :D<20µm)

Bien que la dimension des grains ait une influence , le comportement d'un sol fin est avant tout fonction:

- De sa composition minéralogique,
- De sa teneur en eau,
- Et de sa structure, c'est à dire de la manière dont les particules sont disposées et orientées les unes par rapport aux autres .

En particulier la consistance d'un sol fin varie beaucoup suivant sa teneur en eau, plus précisément, en opérant à teneur en eau décroissante, on rencontre les quatre états de comportement suivants :

4 . Classification des sols

4.2.2. Comportement des sols fins (suite)

- État liquide:

Le sol n'a qu'une cohésion faible .Il a l'aspect d'un fluide . Il tend à s'étaler si on le pose sur une surface horizontale

- Etat plastique :

Le sol a une cohésion plus importante . Posé sur une surface horizontale , il n'a pas tendance à s'étaler mais n'offre aucune résistance à l'action de charges même très faibles .

4 .Classification des sols

- Etat solide avec retrait:

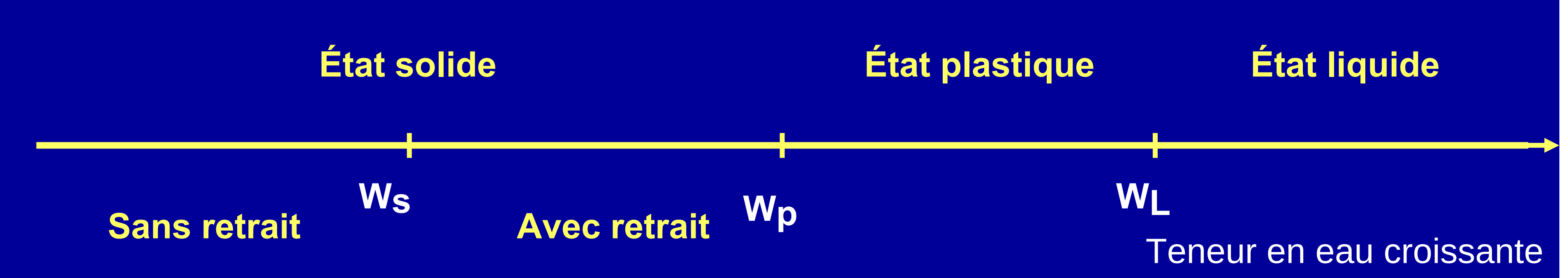
La déformabilité du corps est beaucoup plus faible . Soumis à la déssication , il perd une partie de son eau interstitielle tout en se contractant d'une valeur appréciable .

- Etat solide sans retrait :

La rigidité du corps augmente encore et son volume ne change pas quand sa teneur en eau diminue .

Le passage d'état à l'autre s'effectue évidement d'une façon progressive .

4. Classification des sols



On définit de manière arbitraire pour les sols fins :
- Une limite de liquidité W_L qui sépare l'état plastique de l'état liquide
- Une limite de plasticité W_p qui sépare l'état plastique de l'état solide

L'état solide peut lui- même être séparé en deux états : un état dans lequel l'eau adsorbée est encore en place, appelé état solide avec retrait et un état dans lequel toute l'eau adsorbée a disparu, appelé état solide sans retrait . Le retrait est une diminution de volume qui accompagne l'élimination de l'eau adsorbée .L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité $I_p=W_L-W_p$

Ces limites sont désignées sous le nom de limites d'Atterberg. Bien que leur définition soit très arbitraire , elles ont acquis une importance fondamentale en mécanique des Sols .

4. Classification des sols

Cas particulier des argiles

On définit les argiles comme des sols de diamètre moyen inférieures à 2µm . Il s'agit donc d'un sous groupe des sols fin .
Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicates (Feldpaths mica ….).

Le comportement mécanique d'une argile est fortement influencer par de sa structure cristalline de base . Ces structures cristallines peuvent ètre tel qu'en présence d'eau, elle augmente de volume (3 à 4 fois).On parle alors d'argile active.

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite, l'illite .
Ces différents types d'argiles se comportent différemment vis-à-vis de l'eau .
-La kaolinite est stable au contact de l'eau .
-La montmorillonite n'est pas du tout stable au contact de l'eau . Les sols à forte teneur en montmorillonite sont susceptibles de gonflement et de retrait importants.

Remarque :Le constructeur de manière générale devra toujours se méfier des terrains argileux car se sont des terrains à même de causer de graves désordres sur les ouvrages (argile gonflantes ou encore active) .

5. Paramètres de définition des sols

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir un certain nombre de caractéristiques physiques qui permettront de préciser l'importance de ces différentes phases par rapport à l'ensemble .

A cet effet, nous considérons la représentation suivante d'un sol dans laquelle les trois phases seraient séparées

5. Paramètres de définition des sols

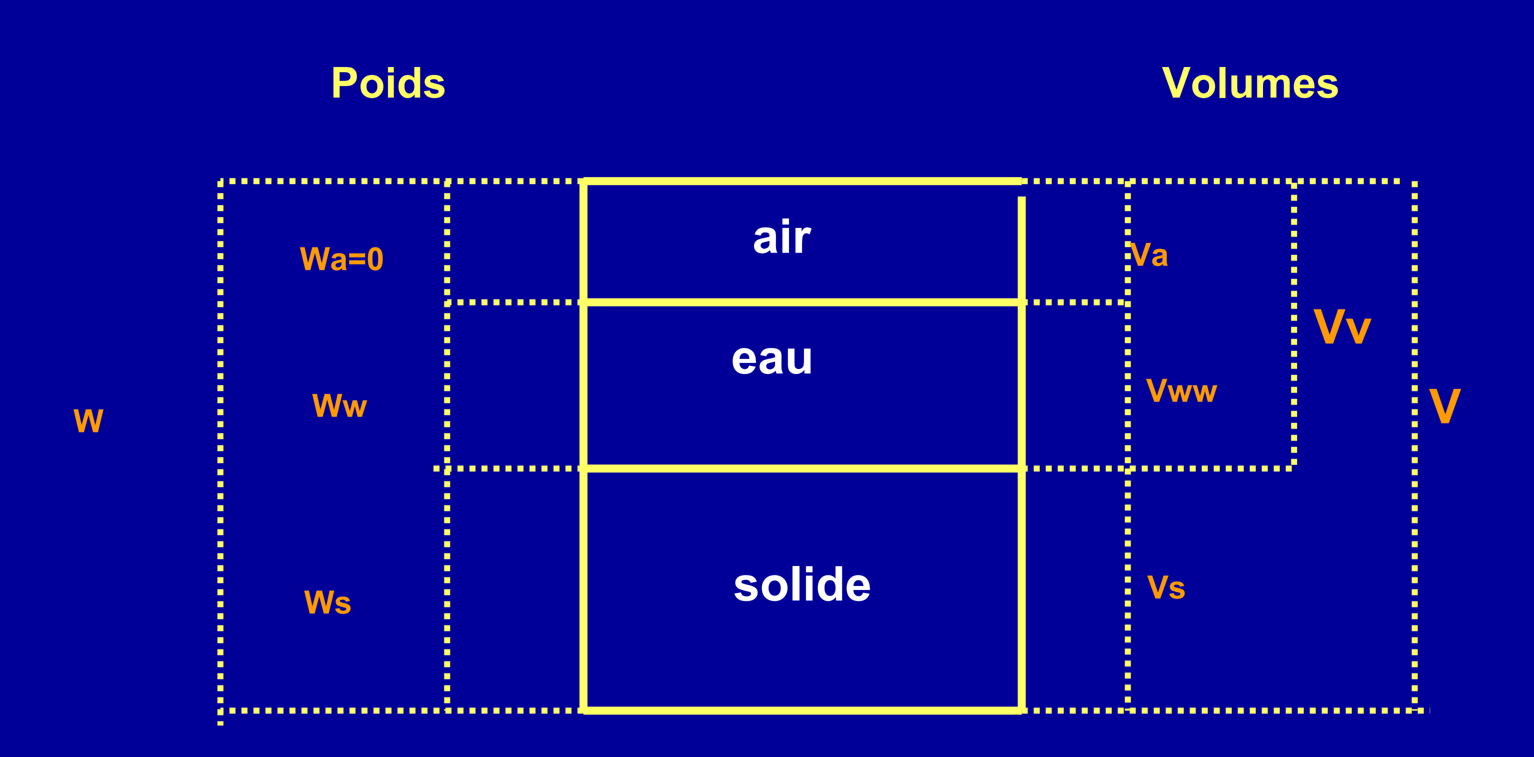


Schéma d'un volume élémentaire de sol
Poids et volumes des différentes phases

5. Paramètres de définition des sols

Les notations conventionnelles sont les suivantes :

Ws :poids des grains solides
Ww : poids de l'eau
Wa :Poids de l'air ;il est en général négligeable (Wa=0)
W : poids total du sol
Remarque : Au laboratoire et par convention ,Ws sera le poids du sol après un séjour de 24h dans une étuve à 105°

Vs : volume des grains solides
Vv : volume des vides entre les grains
Vw : volume de l'eau
Va : volume de l'air
V : volume total

Avec les relations :

W= Ws + Ww
V= Vs + Vv
V= Vs+Va+ Vw
Vv= Vw + Va

5. Paramètres de définition des sols

On définit également les poids volumiques, avec les poids et les volumes , constituent les paramètres dimensionnels :Unité SI N/m3

γ:poids volumique (total ou apparent)du sol

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

γ_s : poids volumique des grains solides :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

γ_d : poids volumique du sol sec :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

γ_w : poids volumique de l'eau :

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

$\gamma_w = \rho * g = 1000\ Kg/m^3 * 9.81 m/s^2 = 9.81.10^3 N/m^3 = 9.81 KN/m^3 = 10 kN/m^3$
$\rho = 1 g/cm^3$

P :Masse volumique du sol Kg/m^3 :

$$\rho = \frac{M}{V}$$

5.Paramètres de définition des sols

Poids volumique déjaugé

Il caractérise un sol plongé dans une nappe d'eau et par conséquent soumis à la poussée d'Archimède : Unité SI N/m^3

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

γ' : poids volumique déjaugé (lorsque le sol est entièrement immergé)

5.Paramètres de définition des sols

Densités :

Densité humide

$$\frac{\gamma}{\gamma_w}$$

Densité sèche

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

Densité des grains

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

5. Paramètres de définition des sols

Les paramètres sans dimension qui indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol sont des paramètres très importants et essentiellement variables .
Ils caractérisent l'état dans lequel se trouve un sol .Ces paramètres sont:
La teneur en eau, l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité .

Teneur en eau :

La teneur en eau est déterminée comme étant le rapport du poids de l'eau au poids des grains solides d'un certain volume de sol . Elle s'exprime en pourcentage .

$$W = \frac{W_w}{W_s} .100\,\%$$

Remarque : Cette teneur en eau peut dépasser 100% .

5. Paramètres de définition des sols

Indice des vides :

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire si le sol est dans un état lâche ou serré. Il est défini comme étant le rapport du volume des vides au volume des grains solides :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Remarque : L'indice des vides peut être supérieur à 1.
e Є[0.10 , 5]

5. Paramètres de définition des sols

Porosité :

On définit également la porosité , dont la signification est analogue à celle de l'indice des vides . Elle est le rapport du volume des vides au volume total :

$$n = \frac{Vv}{V}$$

La porosité est toujours inférieure à 1
nε [0 ; 1]

Compacité :

$$c = \frac{Vs}{V}$$

$$c = 1 - n$$

5.Paramètres de définition des sols

Degré de saturation :

**Le degré de saturation indique dans quelle proportion les vides sont remplis par de l'eau .
Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides .
Il s' exprime en pourcentage:**

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}.100\%$$

Lorsque le sol est saturé, S_r =100%
S_r ε (0;1)
Sol sec S_r=0; saturé S_r=1, un sol est dit saturé lorsque le vide est entièrement occupé par l'eau .

5.Paramètres de définition des sols

Degré de saturation (suite):

Echelle de saturation

Degré de saturation	Etat du sol
0	sec
1-25	Peu humide
25-50	Humide
50-75	Très humide
100	Saturé

6. Importance des paramètres sans dimension

Parmi tous les paramètres définis précédemment, les paramètres sans dimension sont incontestablement les plus importants . Ils définissent en effet l'état du sol, c'est-à-dire l'état de compressibilité (lâche ou serré) dans lequel se trouve le squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air que contient le sol

Le sol grenu a un comportement qui dépend presque uniquement de son état de compacité(lâche ou serré) alors qu'un sol fin a un comportement qui est avant tout fonction de sa teneur en eau .

7. Relations entre les paramètres

Tous les paramètres précédemment définis ne sont pas indépendants et il arrive souvent qu'il soit nécessaire de déterminer les relations existantes entre certains d'entre eux . Les relations les plus importantes sont :

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$$\gamma' = \gamma_d \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s}$$

$$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

$$\gamma = \frac{1 + W}{1 + e} . \gamma_s$$

7. Relations entre les paramètres

Paramètres	Définitions	n	e	γ	γ_d
Teneur en eau ω (%)	$\omega = \frac{W_w}{W_s}$	$\omega = \frac{n.S_r.\gamma_W}{(1-n).\gamma_s}$	$\omega = \frac{e.S_r.\gamma_W}{\gamma_s}$	$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$	$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$
Porosité *n*	$n = \frac{V_a + V_w}{V}$	-	$n = \frac{e}{1+e}$	$n = 1 - \frac{\gamma}{(1+\omega).\gamma_s}$	$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$
Indice des vides *e*	$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s}$	$e = \frac{n}{1-n}$	-	$e = \gamma_s.\frac{(1+\omega)}{\gamma} - 1$	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$
ids volumique apparent $\gamma (KN/m^3)$	$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a}$	$\gamma = (1-n)(1+\omega).\gamma_s$	$\gamma = \frac{(1+\omega)}{1+e}.\gamma_s$	-	$\gamma = (1+\omega).\gamma_d$
ids volumique apparent sec : $\gamma_d (KN/m^3)$	$\gamma_d = \frac{W_s + W_a}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W_s}{V}$	$\gamma_d = \gamma_s.(1-n)$	$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega}$	-
Poids volumique des grains : $\gamma_s (KN/m^3)$	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n).(1+\omega)}$	$\gamma_s = (1+e).\gamma_d$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n).(1+\omega)}$	$\gamma_s = \frac{\gamma_d}{(1-n)}$

7. Relations entre les paramètres

Paramètres connus	Paramètres à déterminer								
	ρ	ρ_d	ρ_{sat}	ρ_s	w [%]	w_{sat} [%]	n [-]	e [-]	S_r [%]
ρ, w	ρ	$\frac{100\,\rho}{100+w}$			w				
ρ_d, n		ρ_d	$\rho_d + n\,\rho_w$	$\frac{\rho_d}{1-n}$		$\frac{100\,\rho_w\,n}{\rho_d}$	n	$\frac{n}{1-n}$	
ρ_d, e		ρ_d	$\rho_d + \frac{e}{1+e}\rho_w$	$\rho_d\,(1+e)$		$\frac{100\,\rho_w\,e}{\rho_d\,(1+e)}$	$\frac{e}{1+e}$	e	
ρ_d, w	$\rho_d\left(\frac{100+w}{100}\right)$	ρ_d			w				
ρ_s, ρ_d		ρ_d	$\rho_d + \left(\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_s}\right)\rho_w$	ρ_s	teneur en eau volumique θ: $\theta = \frac{w\,\rho_d}{\rho_w}$, $w = \frac{\theta\,\rho_w}{\rho_d}$	$\left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)100$	$\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_s}$	$\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_d}$	
ρ_s, ρ_{sat}		$\frac{\rho_{sat}-\rho_w}{1-\frac{\rho_w}{\rho_s}}$	ρ_{sat}	ρ_s		$\frac{100\,(\rho_s-\rho_{sat})}{\rho_s\left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_w}-1\right)}$	$\frac{\rho_s-\rho_{sat}}{\rho_s-\rho_w}$	$\frac{\rho_s-\rho_{sat}}{\rho_{sat}-\rho_w}$	
ρ_s, w_{sat}		$\frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s}+\frac{w_{sat}}{100}}$	$\frac{\rho_s(100+w_{sat})}{100+\frac{\rho_s}{\rho_w}w_{sat}}$	ρ_s		w_{sat}	$\frac{1}{1+\frac{100\,\rho_w}{\rho_s\,w_{sat}}}$	$\frac{\rho_s\,w_{sat}}{\rho_w\,100}$	
ρ_s, n		$\rho_s\,(1-n)$	$(1-n)\,\rho_s + n\rho_w$	ρ_s		$\frac{\rho_w}{\rho_s}\frac{n}{1-n}100$	n	$\frac{n}{1-n}$	
ρ_d, w, S_r	$\rho_d\left(\frac{100+w}{100}\right)$	ρ_d	$\rho_d\left(1+\frac{w}{S_r}\right)$	$\frac{S_r\,\rho_d}{S_r\,\rho_w - w\,\rho_d}$	w	$\frac{w}{S_r}100$	$\frac{w\,\rho_d}{\rho_w\,S_r}$	$\frac{w\,\rho_d}{\rho_w\,S_r - w\,\rho_d}$	S_r
ρ_s, e, w	$\rho_s\left(\frac{1}{1+e}\right)\left(\frac{100+w}{100}\right)$	$\rho_s\left(\frac{1}{1+e}\right)$	$\frac{\rho_s + e\,\rho_w}{1+e}$	ρ_s	w	$\frac{\rho_w}{\rho_s}e\,100$	$\frac{e}{1+e}$	e	$\frac{w\,\rho_s}{e\,\rho_w}$
ρ_s, ρ_d, w	$\rho_d\left(\frac{100+w}{100}\right)$	ρ_d	$\rho_d + \left(\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_s}\right)\rho_w$	ρ_s	w	$\left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)100$	$\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_s}$	$\frac{\rho_s-\rho_d}{\rho_d}$	$\frac{w\,\rho_s\,\rho_d}{(\rho_s-\rho_d)\,\rho_w}$
ρ_s, ρ, S_r	ρ	$\frac{\rho_s\left(\rho - \frac{\rho_w\,S_r}{100}\right)}{\rho_s - \frac{\rho_w\,S_r}{100}}$	$\frac{\rho_s\left(\rho - \frac{\rho_w\,S_r}{100}\right) + \rho_w(\rho_s-\rho)}{\rho_s - \frac{\rho_w\,S_r}{100}}$	ρ_s	$\frac{\rho_w\,S_r\,(\rho_s-\rho)}{\rho_s\left(\rho - \frac{\rho_w\,S_r}{100}\right)}$	$\frac{\rho_w\,(\rho_s-\rho)\,100}{\rho_s\left(\rho - \frac{\rho_w S_r}{100}\right)}$	$\frac{\rho_s-\rho}{\rho_s - \frac{\rho_w S_r}{100}}$	$\frac{\rho_s-\rho}{\rho - \frac{\rho_w S_r}{100}}$	S_r

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.1. Détermination de la teneur en eau W

La teneur en eau se détermine par deux pesées , une avant et une après passage à l'étuve à 105ºC , ce qui donne d'une part W_s+W_w et d'autre part W_s

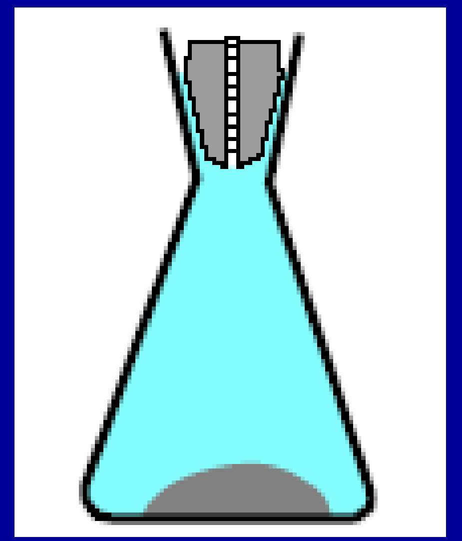
$$W = \frac{W_w}{W_s}.100\,\%$$

8.2.Détermination du poids volumique des grains solides γs

Cette mesure se fait dans un appareil appelé picnomètre .

Un poids connu W_s de sol séché par passage à l'étuve (W=0) est introduit dans un récipient contenant de l'eau distillée . On repére le volume d'eau déplacée par le sol . Le poids Volumique Ws est le rapport du poids Ws au volume Vs :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$



Remarque : Pour la majorité des sol ont le poids volumiques des grains solides est compris entre 26KN/m³ et 28 KN/m³

$$26\ KN/m^3 < \gamma_s < 28\ KN/m^3$$

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.3.Détermination de l'indice des vides e :

C'est une mesure délicate .Il faut déterminer le volume total V de l'échantillon, le poids W_s des grains solides et , connaissant alors le poids volumique de ces grains :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{V.\gamma_s}{W_s} - 1$$

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.4. Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol .Elle s'effectue:

-Par tamisage pour les grain de diamétre supérieur 80 µm ,

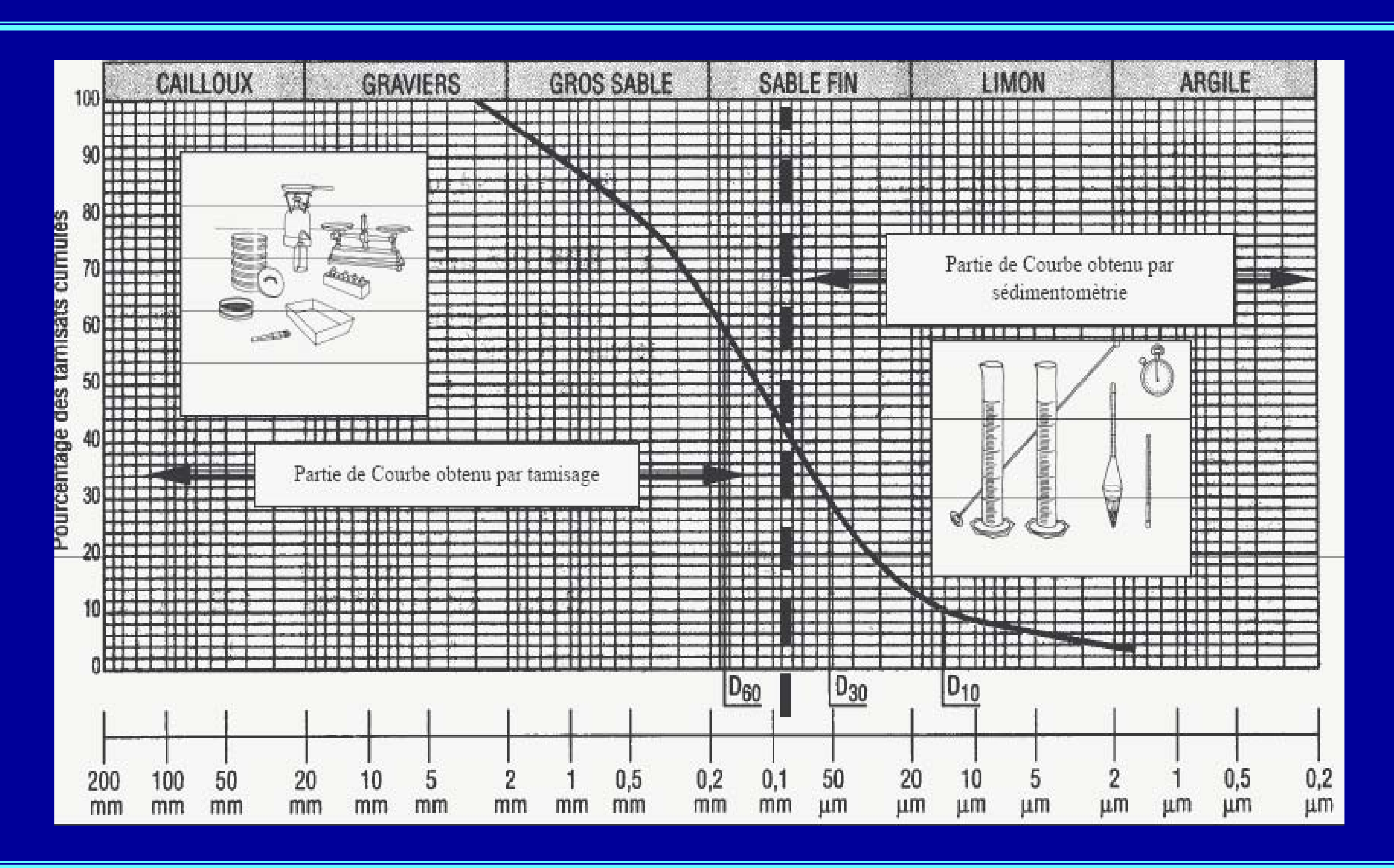
-Par sédimentométrie pour les grains plus fins . L'essai consiste à laisser une suspensioon de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau .Plus les grains sont fins, pls la vitesse de décantation est lente conformémentà la loi de Navier Stokes sur la vtesse de chute de billes sphériques dans l'eau .
La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre ..

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Appareil servant pour la granulométrie



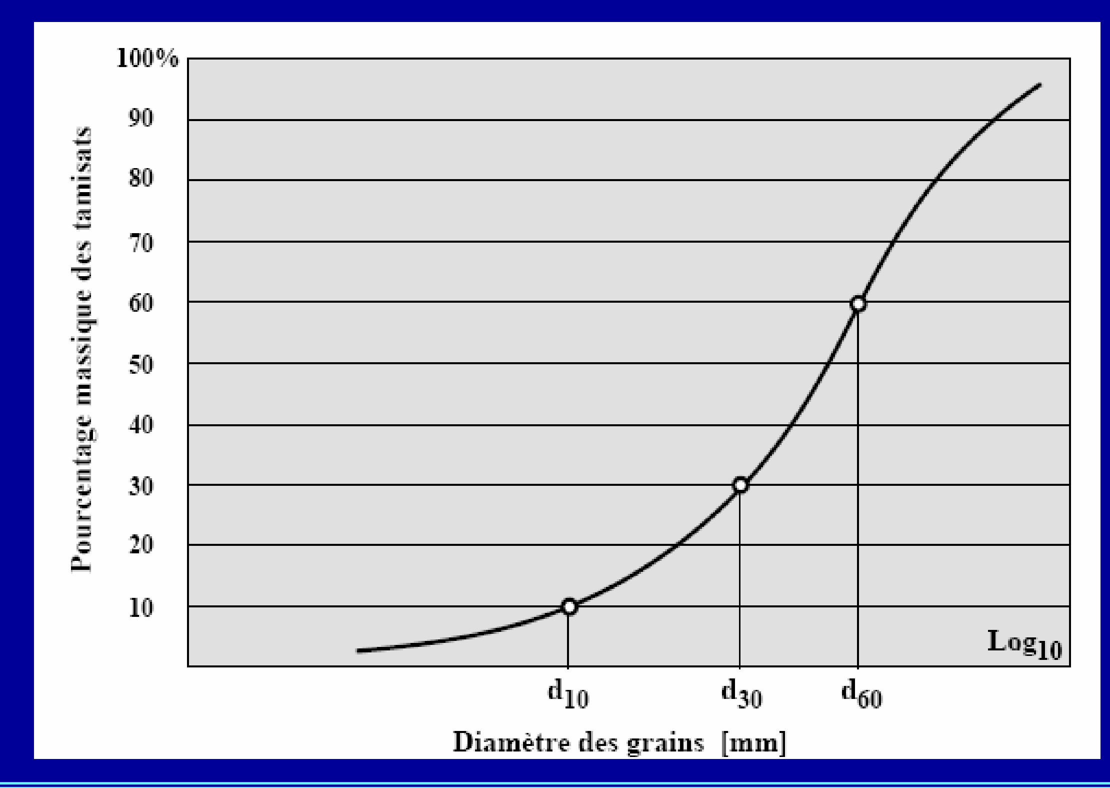
8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire



8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.4. Analyse granulométrique et sédimentométrie (suite) :

Les résultats sont traduits sous forme d'une courbe granulométrique obtenue en représentant en fonction de la dimension D d'un grain le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à D .

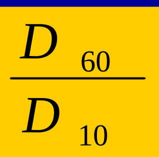


8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

On appelle D_p le diamètre correspondant au pourcentage p .

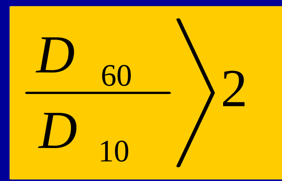
Coefficient d'uniformité :Cu

On définit un coefficient d'uniformité Cu , dit de Hazen , par le rapport



$$\frac{D_{60}}{D_{10}} < 2$$

La granulométrie du sol est dite uniforme



La granulométrie du sol est dite étalée

Diamètre efficace : D_{10}

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Coefficient de courbure :C_c

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}.d_{60}}$$

Remarque : un sol est bien gradué si C_c est compris entre 1 et 3 .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.5. Essais propres aux sols grenus :

En plus des essais précédemment étudiés, certains essais sont spécifiques aux sols Grenus .

8.5.1. Essai d'équivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu . Cet essai est surtout important dans le cas des sols Grenus , car la présence d'élément fins peut modifier le comportement de ces sols.

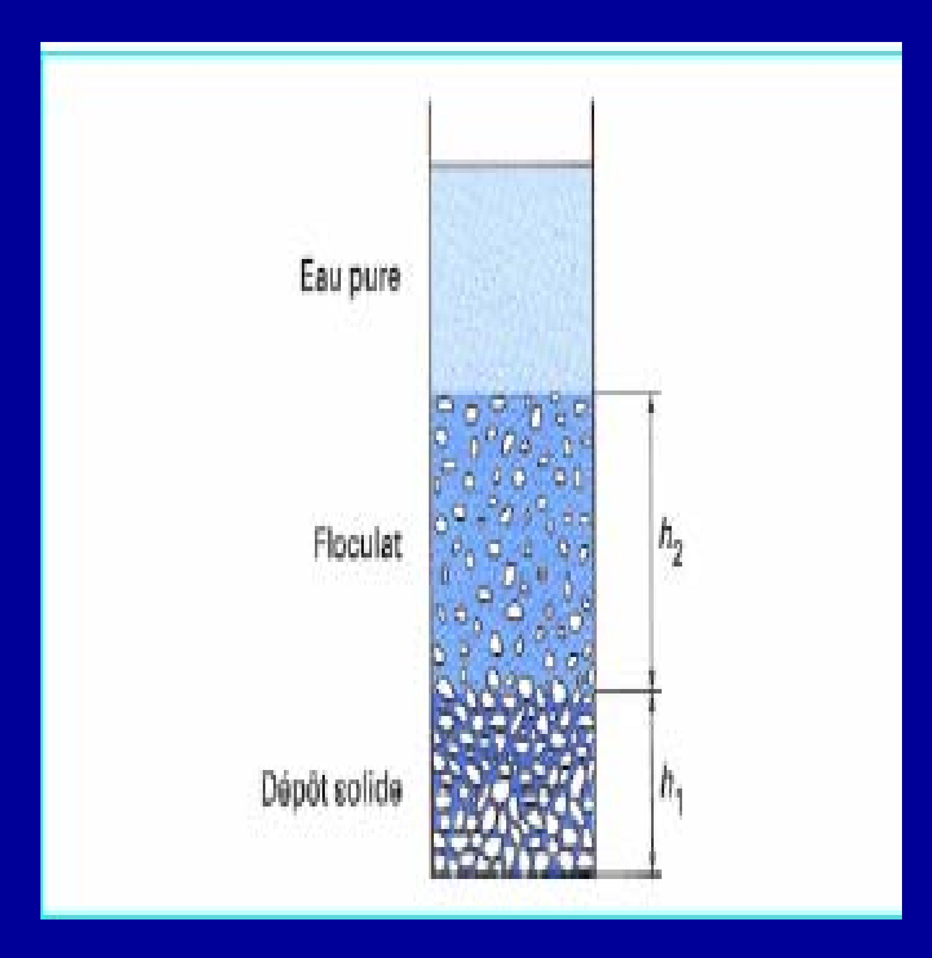
L'essai est effectué sur les éléments inférieurs à 5 mm. Il consiste à placer l'échantillon dans une éprouvette contenant une solution normalisée destinée à disperser les particules du sol et à secouer énergiquement .

On laisse ensuite reposer l'ensemble . Un dépôt solide se forme très rapidement au fond de l'éprouvette . Au bout d'un temps fixé par la norme, on mesure la hauteur h_1 de ce dépôt et la hauteur h_2 du floculat de sol fin .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

L'équivalent de sable E_S s'exprime par le pourcentage :

$$ES = \frac{h_1}{h_1 + h_2}.100$$



E_S=0 Argile pure
E_S=20 Sol plastique
E_S=40 sol non plastique
E_S=100 sable pur et propre

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8. 5. 2. Densité relative ou indice de densité :

Pour caractériser l'état de densité d'un dépôt de sol pulvérulent (type gravier et sable), on est amener à calculer son indice de densité I_d ou densité relative D_t

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}.100$$

e_{min} : indice des vides dans l'état le plus compact ;

e_{max} indice des vides dans l'état le lus lâche ;

e: indice des vides in situ

e_{max} et e_{min} sont déterminés par des essais en laboratoire

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

L'indication de l'indice de densité permet d'avoir une idée sur l'état de tassement d'un sol Donné :Id=0 pour l'état le plus lâche (e= e max) et Id =1 pour l'état le plus compact (e=e min) .

Indice de densité I_D	Etat de compacité du sol grenu
0-15	Très peu compact
15-35	Peu compact
35-65	Compacité moyenne
65-85	Compact
85-100	Très compact

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.6. Essais propres aux sols fins:

8.6.1. Détermination des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pou les éléments fin d'un sol (fraction passant au tamis de 0.4 mm) , car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et observer en sa consistance .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide .On détermine plus particulièrement Les valeurs suivantes :

♦ La limite de plasticité W_p
♦ La limite de liquidité W_L

La connaissance de ces limites est très importante pour l'exécution de travaux de terrassements (fouilles , tranchée ,……). En particulier,si le matériau doit être utilisé après remaniement (remblais barrage en terre…), leur détermination revêt une importance considérable .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

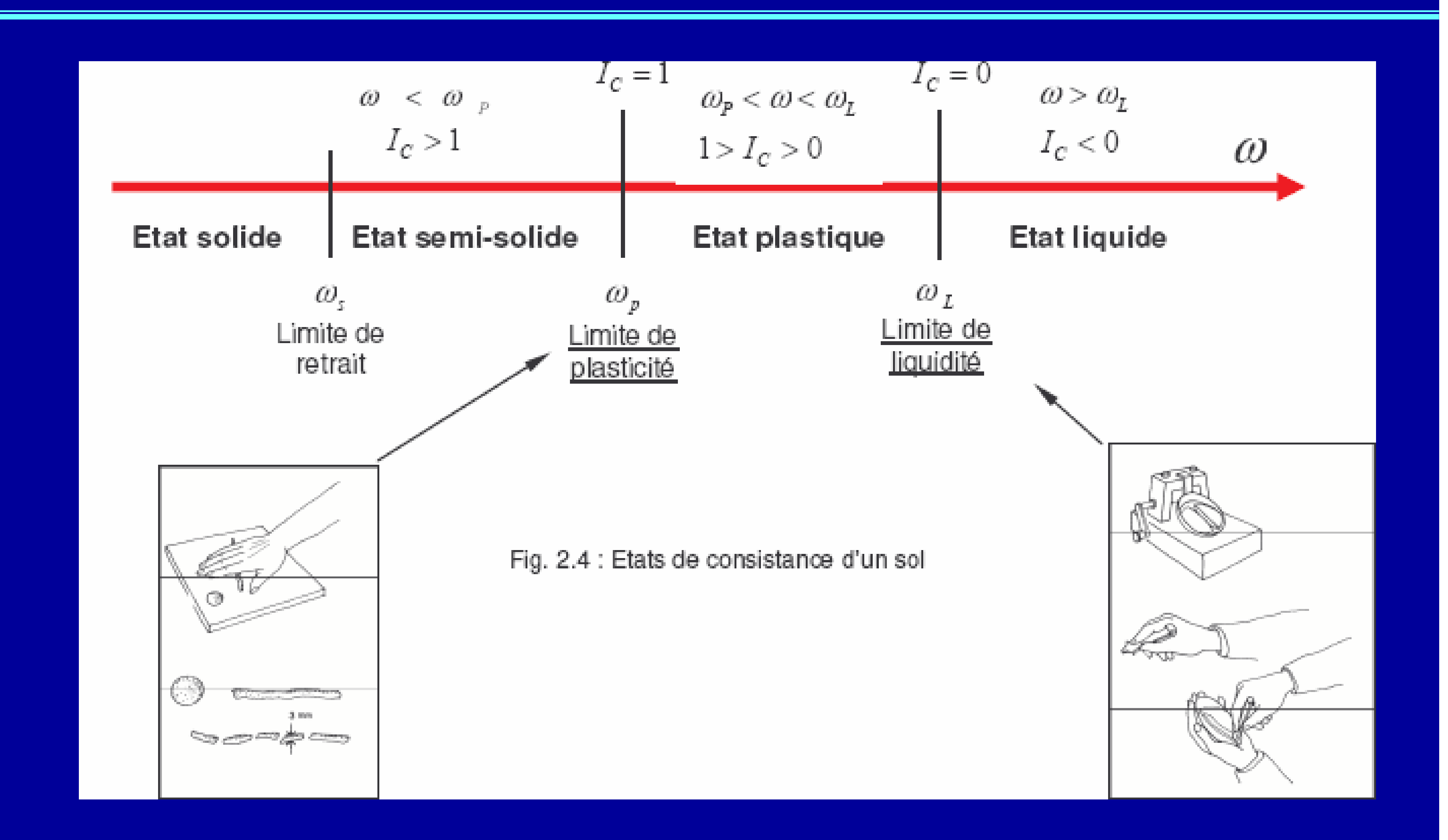
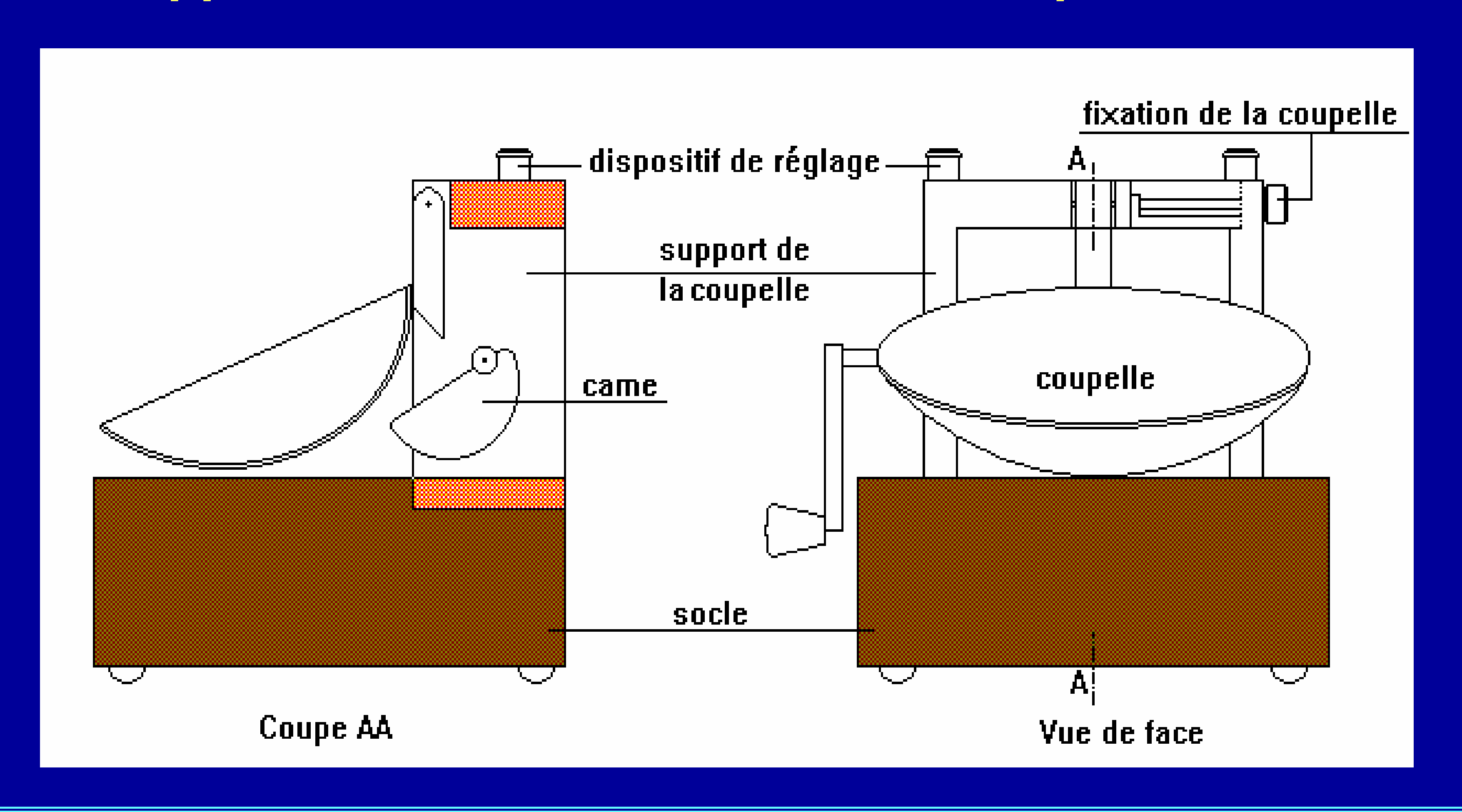


Fig. 2.4 : Etats de consistance d'un sol

Appareil de mesure de la limite de liquidité



8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Indice de plasticité

L'indice de plasticité Ip :C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. L'indice de plasticité mesure l'étendu du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = W_L - W_P$$

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone ou le sol étudié a un comportement plastique .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Classification de l'argilite d'un sol selon l'indice de plasticité

Indice de plasticité I_p	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-10	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

Un sol , dont l'indice Ip est grand , est très sensible aux conditions atmosphérique, car plus Ip est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront important .

Ip précise donc aussi les risques de déformation du matériaux .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Indice de consistance

La comparaison de la teneur en eau naturelle W d'un sol et des limites d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractérisé par son Indice de consistance .

$$I_C = \frac{W_L - W}{W_L - W_P} = \frac{W_L - W}{I_P}$$

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

Etat du sol en fonction de l'indice de consistance

Indice de consistance I_c	Etat du sol
Ic > 1	Solide
0 < Ic < 1	Plastique
Ic < 0	Liquide

L'indice de consistance croit en même temps que la consistance du sol .
à partir de 1, le sol peut être éventuellement réutilisé en remblai (on peut travailler).

Indice de liquidité

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p} = 1 - I_C$$

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8 .6.2 .Valeur au bleu de méthylène

Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation.
En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par les surfaces des particules de sols .

Le résultat VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100 g de sol .
On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol .

Il est effectué sur la fraction 0/2 mm du sol et on distingue les valeurs suivantes :

VBS ≤ 2	Sols sableux (sol insensible à l'eau)
0.2 ≤ VBS ≤ 2.5	Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
2.5 ≤ VBS ≤ 6	Sols limono argileux , (sol de plasticité moyenne)
6 ≤ VBS ≤ 8	Sols argileux
VBS > 8	sols très argileux

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.6.3. Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique d'un sol est généralement un essai qui apporte beaucoup d'informations , car le comportement des sols fins est fonction de leur composition minéralogique . Une forte teneur en montmorillonite indiquera un sol très sensible à l'eau , pouvant donner lieu à des difficultés .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.6. 4 .Teneur en matière organique :

Certains sols , issus de dépôts géologiquement récent , peuvent contenir de la matière Organique. On les identifie in situ à leur couleur grise à noire,à la présence de débris végétaux et leur odeur .

Au laboratoire, la teneur globale en matière organique se mesure sur le résidu passant à 0.4 mm , préalablement séché à 65° , que l'on fait réagir à l'eau oxygénée .
Un deuxième étuvage permet par différence de connaître le poids et donc la teneur en matière organique .

Au delà de 2 à 3 de matière organique, l'utilisation des sols en remblais peut engendrer des problèmes de tassements à long terme .
Les sols contenant plus de 5% de matiére organique sont à proscrire .

C'est un essai intéressant du point de vue de la compressibilité, car les matières organique sont toujours très compressible .

8. Les essais d'identification : Essais au laboratoire

8.6.5. Teneur en CO_3 Ca

La teneur en CO_3 Ca d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau, suivant la valeur de cette teneur en CO_3 Ca, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60% .

9 . Classification géotechnique des sols

9.1.But de la classification

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires .

Il va de soi qu'une telle classification ne peut être basée que sur des corrélations empiriques, elles-mêmes basée sur une grande expérience .

Il existe de par le monde de nombreuses classifications .

9 . Classification géotechnique des sols

9.2. La classification G T R

Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique et utilisée dans les travaux de terrassement . Son utilisation est détaillée dans un guide technique pour la réalisation des remblais et couches de formes, c'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR .

9 . Classification géotechnique des sols (classification G T R)

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50mm$ et passant à $80\mu m > 12\%$ ou passant à $80\mu m \leq 12\%$ + VBS>0,1	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq$ 0,1 et passant à $80\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	
D_{max} = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments			

9 . Classification géotechnique des sols (classification USCS)

1. Système de classification unifié des sols (USCS)

Il a été conçu en 1952 par le professeur Casagrande, le bureau de réclamation (US) et le corps des ingénieur (armée US). Il est applicable : aux projets de fondation ,aux barrages ainsi qu'aux pistes d'atterrissage et autres types d'ouvrages . Le principe de base de l'USCS Consiste à :

- Classes les sols à gros grains (sables et graviers) d'après leurs granulométrie

- Classer les sols à grains fins (silts et argiles) d'après leurs comportements plastiques

9 . Classification géotechnique des sols (classification USCS)

Classification USCS des sols d'après la grosseur des grains

Composante de sol			Symbole	Grosseur [mm]
Blocs			aucun	> 300
Cailloux			aucun	[300 – 75]
Sols à grains grossiers	Gravier	Grossier	G	[75 – 19]
		Fin		[19 – 4,75]
	Sables	Grossier	S	[4,75 – 2,0]
		Moyen		[2,0 – 0,425]
		Fin		[0,425 – 0,075]
Sols à grains fins	Silts		M	< 0,075
	Argiles		C	< 0,075
Sols organiques			O	sans
Tourbes			Pt	sans

9 . Classification géotechnique des sols (classification USCS)

Classification USCS des sols grenus

Catégorie			Symbole	Description	Identification sur terrain (fraction à grosseur < 75 mm)
Sols à grains grossiers (+ 50 % est retenue sur tamis 200)	**Graviers** (+ 50 % de la fraction grossière est retenue sur tamis 4)	gravier propre avec peu ou pas de particules fines	GW	Gravier bien étalés, mélange graviers-sables, peu ou pas de particules fines	Gamme granulométrique étendue, nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires
			GP	Graviers uniformes, mélange graviers-sables, peu ou pas de particules fines	Grosseur prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires
		gravier contenant beaucoup de particules fines	GM	Graviers silteux, mélange gravier-sable-silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité
			GC	Graviers argileux, mélange gravier-sable-argile	Particules fines plastiques
	Sables (+ 50 % de la fraction grossière passe le tamis 4)	sable propre avec peu ou pas de particules fines	SW	Sables bien étalés, sables graveuleux, peu ou pas de particules fines	Gamme granulométrique étendue, nombre élevé de grains de grosseurs intermédiaires
			SP	Sables uniformes, peu ou pas de particules fines	Grosseur prédominante ou gamme granulométrique étendue mais faible représentation de certaines grosseurs intermédiaires
		sable contenant beaucoup de particules fines	SM	Sables silteux, mélange sable-silt	Particules fines non plastiques ou de faible plasticité
			SC	Sables argileux, mélange sable-argile	Particules fines plastiques

9 . Classification géotechnique des sols (classification USCS)

Classification USCS des sols fins

				Identification de la fraction passant le tamis n° 40		
				Résistance au broyage à sec	Résistance aux vibrations	Ténacité
Sols à grains fins (+ 50 % passe le tamis 200)	Silts et Argiles ($W_L < 50$ %)	ML	Silts inorganiques et sables très fins, poussière de roche, sables fins silteux ou argileux, siltes argileux peu plastiques	Aucune à légère	Rapide à lente	Aucune
		CL	Argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne, argile graveleuse, argiles sableuses, argiles silteuses	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Moyenne
		OL	Silts organiques et argiles silteuses organiques de faible plasticité	Légère à moyenne	Lente	Légère
	Silts et Argiles ($W_L > 50$ %)	MH	Silts inorganiques, sables fins micasés ou diatomés	Légère à moyenne	Lente à aucune	Légère à moyenne
		CH	Argiles inorganiques de plasticité élevée, argiles grasses	Elevée à très élevée	Aucune	Elevée
		OH	Argiles organiques de plasticité moyenne à élevée, silts organiques	Moyenne à élevée	Aucune à très lente	Légère à moyenne
Sols fortement organiques		Pt	Tourbes et autres sols fortement organiques	D'après couleur, odeur, contenance spongieuse, structure fibreuse		

9. Classification géotechnique des sols (classification LCP des sols)

Cette classification est celle utilisée dans les pays d'Afrique francophone .Elle a été mise au point en France en 1965 par le laboratoire central des ponts et chaussées . Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (the unified soil classification system) mis au point Par le bureau of reclamation » et « Corps of engineers » aux Etats Unis .

La classification LPC des sols utilise les résultats de l'analyse granulométrique de l'équivalent de sable et des limites d'Atterberg .

Suivant la classification LPC ,on distingue trois grandes type de sol :

-Les sols grenus 50% d'éléments en poids sont supérieurs à 80µ
-Les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à 80 µ
-Les sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée

9 . Classification géotechnique des sols(classification LCP des sols)

Classification LCP
Sols grenus

Définitions			Symboles	Conditions	Désignations géotechniques
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A[17]	grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A[17]	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A[17]	sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A[17]	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % ⇒ on utilise un double symbole
- pour les graves : Gb-GL Gb-GA Gm-GL Gm-GA
- pour les sables : Sb-SL Sb-SA Sm-SL Sm-SA

9 . Classification géotechnique des sols(classification LCP des sols)

Classification LPC :Diagramme de plasticité



Classification LCP
Sols fins

I_p

60
50
40
30
20
10
0

Argiles très plastiques
At

$I_p = 0,73\ (W_L - 20)$

Ligne A

Argiles peu plastiques
Ap

Limons très plastiques
Lt

Limons Lp

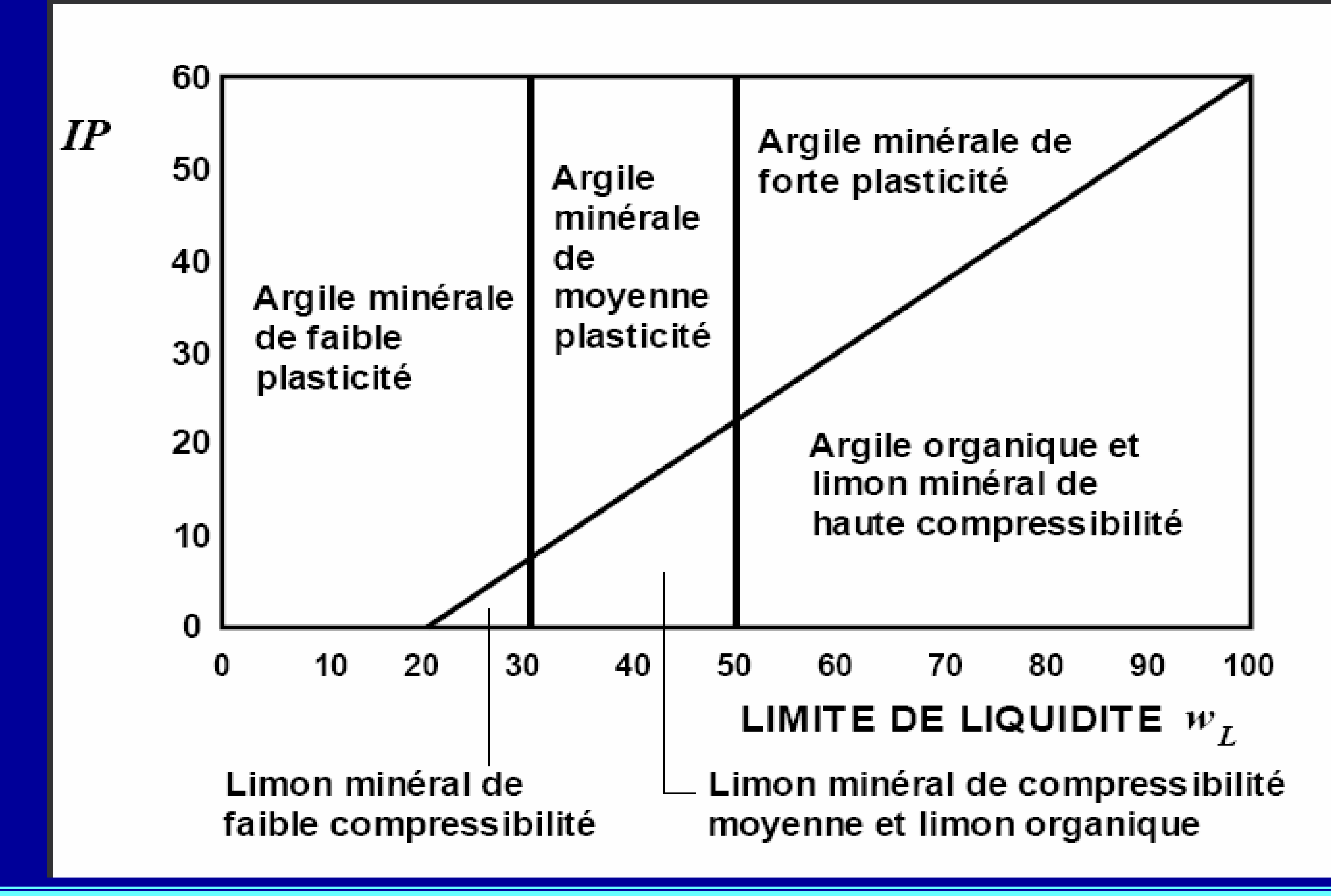
Peu plastiques

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

W_L

9 . Classification géotechnique des sols

Abaque de plasticité de Casagrande (Sols fins et qui fait intervenir les limites d'Atterberg)



Classification normalisée NFP 11.300 réalisée par le LCPC et le SETRA

Sols FINS **A** $d_{max} \leq 50$ mm *et* $d_{35} < 0{,}08$ mm	$VBS \leq 2{,}5$ * ou $IP \leq 12$	**A_1** : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
	$12 < IP \leq 25$ * ou $2{,}5 < VBS \leq 6$	**A_2** : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
	$25 < IP \leq 40$ * ou $6 < VBS \leq 8$	**A_3** : argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
	IP > 40 * ou $VBS > 8$	**A_4** : argiles et argiles marneuses très plastiques

Classification normalisée NFP 11.300 réalisée par le LCPC et le SETRA (suite)

Sols sableux ou graveleux avec fines B	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	**B**$_1$: sables silteux...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$	**B**$_2$: sables argileux (peu argileux)...
$d_{max} \leq 50$ mm *et*	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	**B**$_3$: graves silteuses...
$d_{35} \geq 0,08$ mm	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$	**B**$_4$: graves argileuses (peu argileuses)...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$, $VBS \leq 1,5$ * ou $IP \leq 12$	**B**$_5$: sables et graves très silteux...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$, $VBS > 1,5$ * ou $IP > 12$	**B**$_6$: sables et graves argileux à très argileux.

Classification normalisée NFP 11.300 réalisée par le LCPC et le SETRA (suite)

Sols comportant des fines et des gros éléments **C** $d_{max} > 50$ mm	$d_{12} < 0{,}08$ mm ou $d_{12} > 0{,}08$ mm et $VBS > 0{,}1$	**C** : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.
Sols insensibles à l'eau **D** $VBS \leq 0{,}1$ $d_{12} \geq 0{,}08$ mm	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm	**D1** : sables alluvionnaires propres, sables de dune...
	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm	**D2** : graves alluvionnaires propres, sables...
	$d_{max} > 50$ mm	**D3** : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...

9 . Classification géotechnique des sols(Classification triangulaire)

Classification triangulaire des sols fins utilise seulement la granulométrie

